

Ivan BURAZER

Ante ŠESTAN

Ivica ANČIĆ

Nikola VLADIMIR

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb

HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAV MALOG PUTNIČKOG BRODA

Sažetak

Osnovni ciljevi razvoja modernih brodskih energetske sustava su povećanje energetske učinkovitosti i pouzdanosti te ispunjavanje kriterija ekološke prihvatljivosti. Kriterij ekološke prihvatljivosti je posebno izražen kod putničkih brodova, trajekata, brodova za unutarnju plovidbu, itd. gdje problemi utjecaja na okoliš postaju sve važniji projektni kriterij. U članku je prikazan idejni projekt hibridnog energetske sustava višenamjenskog putničkog broda, koji se sastoji od dizelskog motora, gorivnog članka i baterije kao izvora električne energije. Za tipične režime plovidbe odabranog broda određena je energetska bilanca. Uz analizu energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti, zaključno su istaknute prednosti i nedostaci predloženog rješenja u odnosu na klasične izvedbe brodskih energetske sustava sa smjericama za daljnja poboljšanja.

Ključne riječi: Hibridni brodski energetske sustav, Gorivni članak, Putnički brod

HYBRID POWER SYSTEM OF A SMALL PASSENGER SHIP

Summary

Several basic aims characterize development of modern ship power systems; increase of energy efficiency, increase of reliability level while maintaining acceptable level of environmental acceptability. These demands are particularly emphasized in case of passenger ships, coastal ferries, and ships for inland waterways etc., where environmental issues represent important design criteria. The design of hybrid power system of a multipurpose passenger ship is presented in this paper at the conceptual level. It is comprised of diesel engines, fuel cell and battery as an electricity source. Energy balance has been derived for specific operating modes of the ship. Beside energy efficiency and ecological aspects analyses of the proposed solution, its advantages and drawbacks compared to common ship energy systems are emphasized, and in addition guidelines for future improvements are given.

Key words: Hybrid ship power system, Fuel cell, Passenger ship

1. Uvod

Sve veće potrebe za energijom, zahtjevi za smanjenje emisije stakleničkih plinova te nestabilne cijene nafte koje imaju dugotrajan trend rasta otvaraju vrata obnovljivim izvorima energije u svim granama industrije. Pomorski promet ovdje nije izuzet te mora biti u korak s novim tehnologijama i zakonodavstvom. U suvremenoj brodogradnji postoji niz inicijativa usmjerenih prema korištenju hibridnih modela energetskih sustava LNG pogona, gorivnih članaka i obnovljivih izvora energije. Uporaba gorivnih članaka u brodogradnji bilježi rast posebno razvojem niskotemperaturnih PEM (eng. *Proton Exchange Membrane*) gorivnih članaka. Suvremeni gorivni članci koji kao gorivo koriste čisti vodik (dobiven iz prirodnog plina ili obnovljivih izvora energije) predstavljaju perspektivan i moguć ekološki održiv izvor energije. Iako je već i intuitivno jasno da hibridni pogon po ekonomskim kriterijima još dugo neće biti konkurentan klasičnom pogonu dizelskim motorom, ponekad se, kao npr. u zaštićenim prirodnim područjima, nameće kao pogodna alternativa klasičnom rješenju.

U ovom radu predstavljen je idejni projekt hibridnog energetskog sustava malog putničkog broda, namijenjenog za plovidbu u zaštićenim prirodnim područjima, kojeg čine dizelski motor, gorivni članak i baterije.

2. Hidrodinamičke značajke broda

Kapacitet broda iznosi 240 putnika (40 u kabinskom smještaju) uz 20 članova posade [1]. Područje plovidbe je teritorijalno more Republike Hrvatske. Projektom je predviđeno da se brod koristi u jednom od dva tipična eksploatacijska režima, i to prilikom razgledavanja nacionalnih parkova i posebnih prirodnih staništa (krstarenje brzinom od 8 čv) i plovidbom od matične luke do zaštićenih područja i natrag (plovidba otvorenim morem brzinom od 15 čv).

Glavne značajke i dimenzije analiziranog broda su:

Duljina preko svega: $L_{OA} = 37,3 \text{ m}$

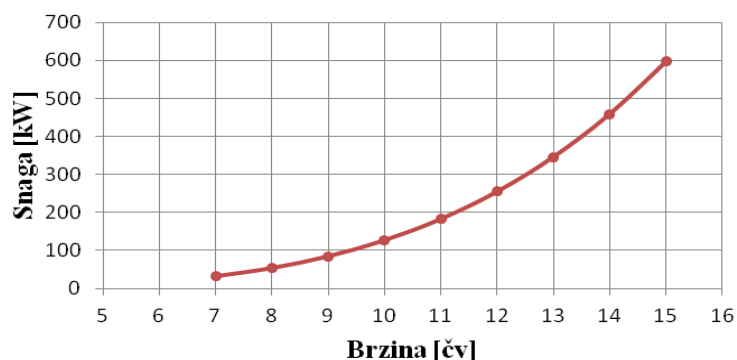
Duljina između okomica: $L_{PP} = 34,0 \text{ m}$

Širina: $B = 9,4 \text{ m}$

Gaz: $T = 2,3 \text{ m}$

Istisnina: $D = 340 \text{ t}$

Za odabrani raspon brzina, komercijalnim programskim paketom [2] napravljen je proračun otpora broda, na temelju čega je izračunata snaga poriva P_T , Slika 1.



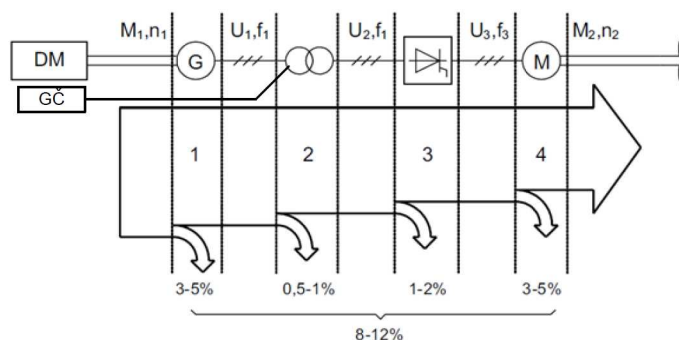
Slika 1. Snaga poriva

Fig. 1 Thrust power

3. Energetska bilanca broda u tipičnim eksploatacijskim režimima

U koncepciji broda s potpuno integriranim hibridnim elektroenergetskim sustavom, kao što je brod analiziran u ovom radu, kojeg karakterizira jedna električna centrala s konstantnom frekvencijom i naponom mreže te regulacija broja okretaja propulzijskih elektromotora pomoću statičkih pretvarača frekvencije, sustav električnog prijenosa snage na brodski vijak pretpostavlja četiri stupnja konverzije energije, Slika 2:

- mehaničko-električnu konverziju u sinkronim generatorima,
- transformaciju napona u transformatorima,
- regulaciju frekvencije i napona u pretvaračima frekvencije
- električno-mehaničku konverziju u propulzijskim elektromotorima.



Slika 2. Bilanca snage propulzije s električnim prijenosom

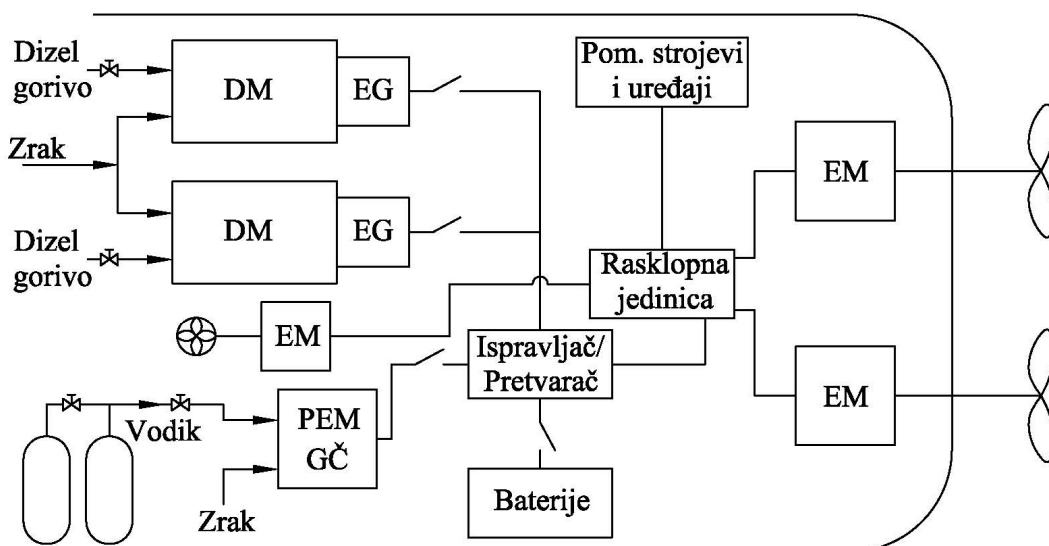
Fig. 2 Propulsion power balance with electric transmission

U slučaju manjih plovih objekata, u kojima se zbog male ukupne instalirane snage ne primjenjuje visoki napon, otpada drugi stupanj pretvorbe. Iz bilance snage prikazane na Slici 2 vidljivo je da, usprkos visokom stupnju djelovanja pojedinih elemenata u sustavu električne propulzije, ipak se u električnom prijenosu energije do brodskog vijka sveukupno izgubi 8-12 % snage. U usporedbi s mehaničkim prijenosom snage kod kojega su gubici snage 2-4 %, električni prijenos je s energetske gledišta lošiji izbor. Prednost električne propulzije je međutim sadržana u mogućnosti povećanja stupnja korisnosti na početku i na kraju propulzijskog lanca [3]. Električna propulzija omogućuje rad pogonskih strojeva u području oko optimalne brzine vrtnje bez obzira na eksploatacijski profil plovila. U Tablici 1. su prikazane potrebne snage propulzijskih elektromotora za krstarenje i plovidbu otvorenim morem hibridnog sustava kakav je prikazan na Slici 3.

Energetska bilanca, uzimajući u obzir faktor stvarnog korištenja K_o koji predstavlja stvarno opterećenje uređaja i strojeva u postocima, te faktor istovremenog korištenja K_i , prikazana je u Tablici 2. Na temelju prikazane energetske bilance određena je zahtijevana snaga električnih izvora koja, uzimajući u obzir gubitke u ispravljačima, pretvaračima i ostaloj rasklopnoj opremi, iznosi 995.3 kW [1]. Podjela ukupne instalirane električne snage prema pojedinim izvorima prikazana je na Slici 4. Pri krstarenju je predviđeno da je dizelski motor ugašen, a sve potrebe za energijom su pokrivene gorivnim člankom. Baterije pokrivaju vršna opterećenja, ali ponajviše služe kao amortizacija sporog odziva snage jedinice gorivnog članka, pa je prema tim zahtjevima i određen njihov kapacitet. Najveće nagle promjene snage se događaju u naglim manevrima ili prilikom pristajanja u blizini obale [1]. Na otvorenom moru je predviđeno da potrebe za energijom pokrivaju zajedno dizel-agregati i gorivni članak.

Tablica 1. Snage u raznim režimima eksploatacije**Table 1** Powers in different exploitation regimes

Brzina, čv	Snaga otpora, P_E , kW	Snaga poriva, P_T , kW	Snaga predana vijku, P_D , kW	Snaga elektromotora, P_{EM} , kW
8	50.6	53.13	78.1	85.6
15	568.6	597.1	878	962.7



DM - Dizelski motor

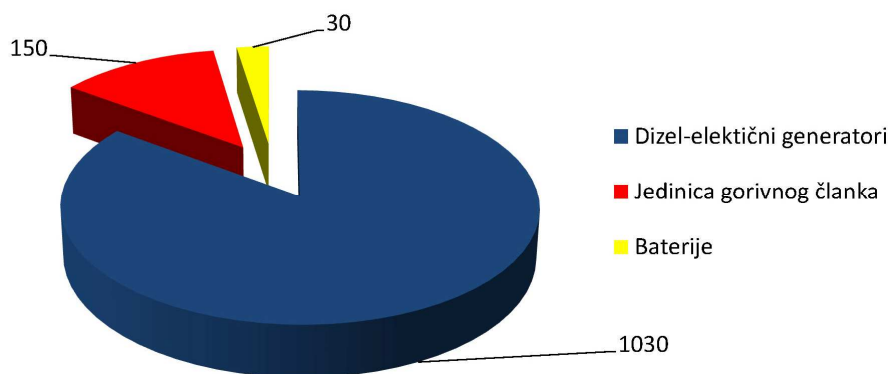
EM - Elektromotor

EG - Električni generator

PEM GČ - Proton Exchange Membrane gorivni članak

Slika 3. Konfiguracija energetskog sustava**Fig. 3** Power system configuration**Tablica 2.** Energetska bilanca potrošnje električne energije u određenim režimima plovidbe**Table 2** Electric power balance for specific navigation modes

Potrošač	Snaga [kW]	Plovidba 8 čv	Plovidba 15 čv	Manevar	Rad u luci
		$K_o \cdot K_i$			
Propulzijski elektromotori	962,7 (85,6)	1	1	0,7	0
Bočni porivnik	20	0,3	0	1	0
Pritezno/sidreno vitlo	5,5	0	0	1	0
Pumpe sustava kaljuže	2,32	0,6	0,6	0,6	0,2
Pumpe sustava balasta	1,74	0,8	0,8	0,2	0,6
Protupožarni sustav	2,26	1	1	1	1
Sustav ventilacije strojarnice	3,63	0,3	1	1	0,3
Klimatizacija i ventilacija prostora	8,5	1	1	1	0,6
Pumpa hidrofora pitke vode	0,95	1	1	1	0,8
Navigacijska oprema	3,23	1	1	1	0
Ostala oprema	20,38	0,58	0,74	0,74	0,64
Ukupno [kW]	1027	117,30	995,3	730,9	19,7



Slika 4. Električna snaga pojedinih energetskih izvora [kW]

Fig. 4 Electrical power of particular energy sources [kW]

Za jedinicu gorivnog članka odabran je „FCvelocity-HD6“ nazivne snage 150 kW [4] koji koristi kao pogonsko gorivo vodik čistoće SAE J2719, a kao oksidant zrak. Gorivni članak ima nešto veću snagu od potrebne jer pri nižem opterećenju gorivni članak ima veću korisnost, a i s vremenom, zbog onečišćenja elektroda, dolazi do pada napona.

Kao pogonski uređaji odabrana su 2 dizel-električna agregata „Mitsubishi MAS S6R-MPTA“ nazivne snage 515 kW pri 1500 o/min [5] pri čemu je predviđeno u energetske bilanci da će dizelski motori mogli raditi na 85 % maksimalne trajne snage.

Odabrana je baterija tipa ZEBRA oznake Z5-278-ML3X-76 kapaciteta 76 Ah, nazivne energije 21,2 kWh, napona 278 V pri 85 % napunjenosti te najveće struje pražnjenja 224 A. Vršna snaga 30 kW tijekom 30 s je dovoljna za pokrivanje potreba bočnog porivnika. [6]

4. Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost projektnog rješenja

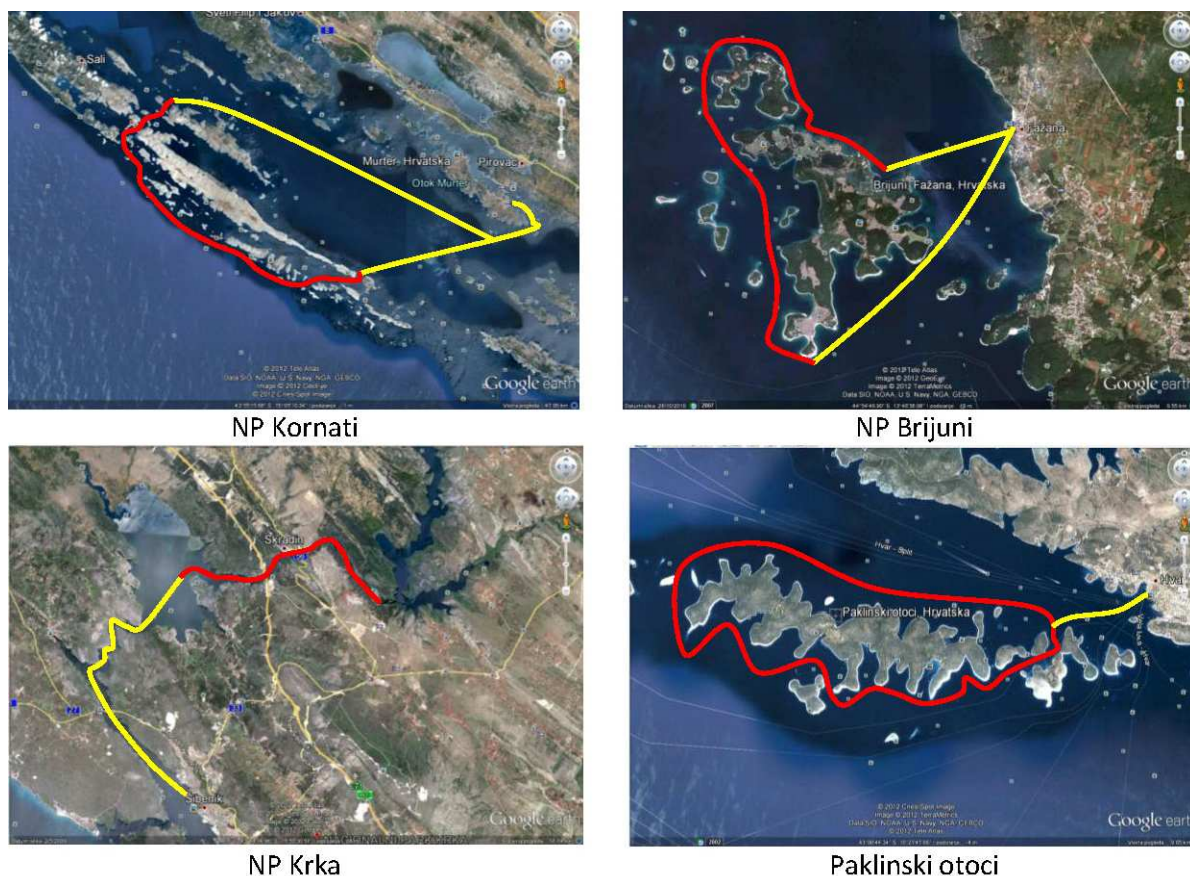
U ovom radu, kao primjer eksploatacijskih područja broda, uzeta su 3 nacionalna parka i jedno otočje na području Republike Hrvatske: NP Kornati, NP Brijuni, NP Krka i Paklinski otoci, Slika 5 [7], pri čemu je svaka ruta podijeljena na temelju brzine plovidbe (crvenom bojom označen je dio rute koji se odnosi na brzinu krstarenja, a žutom dio koji se odnosi na maksimalnu brzinu broda u službi). Ukupni radni sati za jedan izlet turističkim brodom prikazani su u Tablici 3.

Za analizirani brod prikazana je usporedba klasičnog (mehaničkog) i hibridnog električnog energetskog sustava, Tablice 3 i 4. Usporedba je dana za dva režima plovidbe za svaku pojedinu rutu plovidbe. Dizelski motori u oba slučaju koriste lako dizelsko gorivo. Prema Tablici 4. za klasičan sustav odabran je motor Mitsubishi S6R2-MPTK nazivne snage 530 kW pri 1400 o/min za srednji pogon [8]. Cijenom hibridni električni sustav ne može konkurirati klasičnom, no svakako može imati prednost u slučaju strogih zahtjeva za ekološku prihvatljivost što se ponajprije odnosi na emisije CO₂, NO_x i SO_x spojeva.

Tablica 3. Broj radnih sati t po izletu u pojedinom nacionalnom parku

Table 3 Working hours t per tour for particular national park

Nacionalni park	Krstarenje	Otvoreno more	Ukupno
Kornati	2,91	2,34	5,25
Brijuni	0,91	0,37	1,28
Krka	1,19	1,03	2,23
Paklinski otoci	1,41	0,23	1,64



Slika 5. Rute plovidbe broda [7]

Fig. 5 Ship navigation routes [7]

Koristeći (1) te podatke iz Tablica 4 i 5 moguće je izračunati ukupnu emisiju CO_2 za pojedine rute. Koeficijent pretvorbe goriva u CO_2 iznosi za lako dizelsko gorivo $C_F = 3,206$ [9].

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{MDO1}} \cdot C_F \cdot t_{\text{krstarenje}} + m_{\text{MDO2}} \cdot C_F \cdot t_{\text{otvoreno}} \quad (1)$$

Tablica 4. Parametri klasičnog energetska sustava

Table 4 Parameters of classical power system

	P_D [kW]	η_{meh}	P_B [kW]	g_d [g/kWh]	P_{pom} [kW]	η_{Gen}	P_{Bpom} [kW]	g_{pom} [g/kWh]	m_{MDO} [kg/h]
Krstarenje	78	0,96	81	242	47	0,92	51	242	31,9
Otvoreno more	878	0,96	915	220	54	0,92	59	220	214,3

Tablica 5. Parametri hibridnog energetska sustava

Table 5 Parameters of hybrid power system

	$P_{G\check{C}}$ [kW]	\dot{m}_{gH_2} [kg/h]	P_B [kW]	g_d [g/kWh]	m_{MDO} [kg/h]
Krstarenje	117	0,55	0	0	0
Otvoreno more	117	0,55	878	204	179,1

Tablica 6. Ukupne emisije CO₂ za različite slučajeve

Table 6 Total CO₂ emissions for different cases

Sustav	Ruta	m_{CO_2} krstarenje	m_{CO_2} otvoreno	Ukupno kg CO ₂	Razlika, %
Klasični	Kornati	298	1608	1906	-
Hibridni		0	1344	1344	29,5
Klasični	Brijuni	93	254	347	-
Hibridni		0	212	212	38,9
Klasični	Krka	122	708	830	-
Hibridni		0	591	591	28,8
Klasični	Paklinski otoci	144	158	302	-
Hibridni		0	132	132	56,3

Osim emisija CO₂, koje su prikazane u Tablici 6, i emisije NO_x i SO_x spojeva kod klasičnog energetskog sustava su također znatno veće nego kod hibridnog sustava, što je detaljno elaborirano u [1].

5. Zaključak

Područja nacionalnih parkova i zaštićenih područja predstavljaju mjesta na kojima se brodski hibridni električni sustav nameće kao alternativa klasičnom rješenju s dizelskim motorom. U članku je prikazan idejni projekt hibridnog energetskog sustava malog putničkog broda, koji se sastoji od dizelskog motora, gorivnog članka i baterije kao izvora električne energije. Za tipične režime plovidbe odabranog broda određena je energetska bilanca te emisije stakleničkih plinova u odnosu na klasične izvedbe brodskog energetskog sustava.

Hibridni sustavi se investicijskim troškovima i troškovima održavanja još uvijek ne mogu uspoređivati s klasičnim izvedbama brodskog energetskog sustava, ali se te razlike već smanjuju zbog sve veće primjene i razvoja [10]. Problemi uporabe vodika kao energenta vezani su za cijenu njegove proizvodnje, teškoće u skladištenju, nedostatak opskrbe mreže itd. Važno je napomenuti da vrijeme hibridnih pogona tek dolazi, te su potrebna još mnoga tehnološka dostignuća na području gorivnih članaka i obnovljivih izvora energije kako bi tehnologija temeljena na vodiku kao osnovnom energentu postala konkurentnija klasičnim sustavima temeljenima na fosilnim gorivima.

Literatura

- [1] BURAZER, I.: „Idejni projekt hibridnog energetskog sustava putničkog broda“, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [2] ...: “NavCad”, User’s Manual. HydroComp, Inc. Durham, NH USA, 2009.
- [3] VUČETIĆ, J.D., TURKOVIĆ, D.: “Eksploatacijske prednosti električne propulzije”, Pomorstvo, 20(2006)1, p. 129-145.
- [4] <http://www.ballard.com/files/PDF/Bus/HD6.pdf>
- [5] http://beepdf.com/doc/200099/mitsubishi_marine_genset.html
- [6] http://www.fzsonick.com/uploads/scheda_tecnica_Zebra_Sonick.pdf
- [7] <http://www.google.com/earth/index.html>
- [8] <http://mitabmarin.se/pdf/Mitsubishi/Leaflet%20MAS%20675-S.pdf>
- [9] Rezolucija MEPC.212(63)
- [10] LIPMAN, T.E., EDWARDS, J.L., KAMMEN, D.: “Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems”, Energy Policy 32(2004), p. 101-125.